

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ПРИЛАДОБУДІВНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ ОРІЄНТАЦІЇ ТА НАВІГАЦІЇ**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Бурау Н.І.

« ____ » _____ 2019 р.

Дипломний проект

**на здобуття ступеня бакалавра з напрямку підготовки 051003 -приладобудування
спеціальності 6. 05100303 – прилади і системи орієнтації та навігації**

на тему: «Маятниковий акселерометр з компенсацією динамічної похибки»

Виконав:

студент групи ПГ-пб1

Грицай Владислав Олександрович

Керівник:

доцент, к.т.н,

Мироненко Павло Степанович

— _____

Рецензент:

Ст. викл.

Таранов В.В.

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Приладобудівний факультет

Кафедра приладів і систем орієнтації та навігації

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки (програма професійного спрямування) – 6.051003
«Приладобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Бурау Н.І.

«__» _____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Грицаю Владиславу Олександровичу

1. Тема проекту «Маятниковий акселерометр», керівник проекту Мироненко Павло Степанович, доцент, к.т.н., затверджені наказом по університету від _____ 2019 р. № _____

2. Термін подання студентом проекту 10.06.2019

3. Вихідні дані до проекту:

Вимірюване прискорення амплітудою $0,1g - \pm 20g$, частотою до 10 Гц, постійне прискорення до 3g. Температурний режим роботи $\pm 60^{\circ}C$. Конструктивні параметри компенсаційного зв'язку вибирати самостійно.

4. Зміст пояснювальної записки

1. Вступ
2. Вибір конструктивної схеми .
3. Розрахунок чутливого елементу.
4. Розрахунок пружного підвісу
5. Розрахунок датчика моменту
6. Розрахунок похибок акселерометра.
7. Висновок

						Арк.
						1
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Перелік графічного матеріалу:

Кінематична схема приладу, збіркове креслення акселерометра, робочі креслення деталей акселерометра, ілюстративний матеріал.

6. Консультанти розділів проекту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка

Студент

Грицай В.О.

Керівник проекту

Мироненко П.С.

					Арк. 2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Анотація

Автор: Грицай В.О.

Тема дипломного проекту «Маятниковий акселерометр з компенсацією динамічної похибки».

Обсяг дипломного проекту 35 сторінок, він містить 14 малюнків та 5 джерел літератури.

В даному проекті проведено розрахунок маятникового акселерометру компенсаційного типу. Акселерометр – це датчик, що вимірює прискорення та перетворює діюче прискорення в пропорційний йому електричний сигнал. Такий прилад містить інерційну масу, переміщення якого відносно корпусу приладу обмежене пружним підвісом.

В даному проекті була вибрана конструктивна схема акселерометру з ємнісним датчиком кута та магнітоелектричним датчиком моменту. Приведені розрахунки основних елементів. Визначено передавальну функцію даного акселерометру, побудовано його математичну модель, приведено відповідний ілюстративний матеріал. В графічній частині проекту розроблено складальне креслення приладу, кінематична і електрична схеми та робочі креслення деталей.

						Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Annotation

Author: Hrytsai V.O.

The theme of the diploma project "Pendulum accelerometer with dynamic error compensation".

The volume of the diploma project is 35 pages, it contains 14 pictures and 6 sources of literature.

In this project, the calculation of the compensating type swing accelerometer was performed. Accelerometer - a sensor that measures the acceleration and transforming the current acceleration into an electric signal proportional to it. This device contains an inertial mass, the movement of which in relation to the device body is limited elastic suspension.

In this project, the design scheme of the accelerometer with capacitive angle sensor and magneto-electric moment sensor was chosen. Calculations of basic elements are given. The transfer function of this accelerometer is determined, its mathematical model is constructed, illustrative material is developed. In the graphic part of the project the assembly drawing of the device, kinematic and electrical schemes are developed and drawings of details.

						Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перелік скорочень

ДА – датчика акселерометра

ДК – датчик кута

ДМ – датчик моменту

ДП – датчик переміщення

ДП – датчика переміщення

ЕМ – електронного модуля

ЄД – ємнісний датчик

ЗКП – зворотний компенсаційний перетворювач

ЗН – зміщення нуля

ІМ – інерційної маси

КП – коефіцієнта передачі

МП – мікроакселерометр

ПЕ – пружних елементів

ПП – пружний підвіс

РС – регулятор струму

СД – світлодіод

ТД – термодатчик

ФД – фотодіод

ЧЕ – чутливий елемент

						Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	7
1.ОГЛЯД ВИМІРЮВАЧІВ ПРИСКОРЕНЬ.....	11
1.1. Маятникові акселерометри	11
1.2. Компенсаційні акселерометри	14
1.3. Осьові акселерометри	15
2. РОЗРАХУНОК ТА ПРОЕКТУВАННЯ АКСЕЛЕРОМЕТРА	20
2.1. Вибір конструктивної схеми.....	20
2.2. Розрахунок чутливого елемента	22
2.2.1. Опис роботи ЧЕ	22
2.2.2. Розрахунок ЧЕ	24
2.3. Розрахунок пружного підвісу ЧЕ	25
2.3.1 Розрахунок кутової жорсткості підвісу	25
2.3.2 Вибір жорсткості електричної пружини	28
2.4. Розрахунок датчика переміщень	28
2.5 Розрахунок датчика моменту.....	31
3. РОЗРАХУНОК ПОХИБОК АКСЕЛЕРОМЕТРА	34
3.1. Ідеальне встановлення	35
3.2. Кутовий перекис	35
3.3. Лінійний зсув уздовж осі ОУ	36
3.4. Компенсація динамічної похибки	38
ВИСНОВКИ:	40
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:	41

Вступ

Акселерометри - датчики лінійних прискорень, призначені для вимірювання прискорення об'єкту, що рухається та перетворення прискорення в електричний сигнал. Сигнали, пропорційні прискоренню, використовують для стабілізації і автоматичного управління рухомими об'єктами.

На сучасних літаках, ракетах, супутниках і космічних кораблях акселерометри застосовуються в автопілотах для поліпшення характеристик стійкості і керованості об'єкта, а в системах інерційної навігації - в якості основних датчиків, призначених для вимірювання прискорення, з яким переміщується центр мас об'єкта. Акселерометри використовуються також в якості індикаторів площини горизонту в системах горизонтування гідростабілізованих платформ та інших пристроїв.

При експлуатації на рухомих об'єктах акселерометри піддаються кліматичним та механічним впливам. Земна атмосфера в залежності від місця, часу року і висоти над рівнем моря має широкий діапазон зміни стану по температурі, тиску, вологості, іонізації і іншим параметрам. Для більшості приладів (зокрема, акселерометрів) діапазон температур, в якому прилади повинні забезпечувати нормальну роботу, лежить в межах від - 60 до + 50 ° С. В окремих випадках температура повітря, що оточує прилад в процесі експлуатації, може значно перевищувати + 50 ° С і досягати величини + 80 - 100 ° С. Зі збільшенням висоти польоту змінюється склад навколишнього повітряного середовища-зменшуються щільність і тиск повітря, його діелектрична постійна падає, а іонізація повітря зростає. Все це веде до того, що для негерметизованих приладів погіршуються тепловіддача і електроізоляція. Висока концентрація озону на великих висотах сприяє окисленню металу і органічних матеріалів. При роботі приладів в вакуумі можливі випаровування мастила та дифузійне зварювання контактуючих елементів. У нижніх шарах атмосфери на працездатність приладу сильно впливає вологість повітря і його запиленість. Сучасні прилади повинні забезпечувати нормальну роботу при відносній вологості до 98% і запиленості повітря, відповідної загальним технічним умовам.

					Арк. 7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Крім кліматичних факторів на точність і надійність роботи приладів впливають механічні дії, які виникають при русі об'єкта з лінійними і кутовими прискореннями. Схема і конструкція акселерометра повинні забезпечувати вимірювання прискорення з необхідною точністю в заданому діапазоні частот і амплітуд вібраційних і лінійних перевантажень при можливих кліматичних впливах.

Акселерометр являє собою прилад, що містить інерційний елемент, переміщення якого щодо корпусу приладу обмежене пружною зв'язкою. За типом інерційного елемента акселерометри можуть бути розбиті на два класи:

1. Акселерометри з поступально рухомим інерційним елементом - осьові.
2. Маятникові акселерометри.

У акселерометрах компенсаційного типу для отримання інформації про величину прискорення використовується датчик кута (ДК). Найбільшого поширення як в навігаційних, так і в промислових зразках акселерометрів отримали фотодатчики (ФД) і датчики ємнісного типу (ЄД).

Використання ФД дозволяє для посилення корисного сигналу використовувати відносно нескладні електронні схеми. У типовому акселерометрі компенсаційного типу застосований такий ДК.

Основними елементами цього вимірювального пристрою є:

- світлодіод SD;
- фотодіод VD1;
- опір, що перетворює напругу в струм зворотного зв'язку RI;
- обмотка датчика моменту (ДМ) L.

Принцип дії даного маятникового акселерометра в аналоговому (штатному) режимі полягає в наступному. При виникненні уявного прискорення A_{yx} , спрямованого уздовж осі чутливості, маятник і жорстко пов'язана з ним шторка, яка прагне зберегти положення незмінним, почне розгортатися щодо корпусу акселерометра. В результаті відносного обертання один з світлодіодів буде засвічуватись більше, ніж інший. Внаслідок чого виникне різниця потенціалів на виході ДК. Ця напруга буде подано на вхід підсилювача і після посилення в вигляді

					Арк.
					8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

струму зворотного зв'язку надійде в обмотку ДМ. ДМ сформує компенсуючий момент, який поверне маятник в початковий стан. Таким чином, за величиною струму зворотного зв'язку можна буде судити про значення уявного прискорення.

Акселерометр компенсаційного типу містить чутливий елемент з рідинним демпфуванням, елементи в системи зворотного зв'язку, що включає датчик переміщень, підсилювач-перетворювач і датчик моменту. У ланцюг між датчиком переміщення і підсилювачем-перетворювачем введено керований за коефіцієнтом посилення від напівпровідникового терморезистора підсилювач. При цьому терморезистор встановлюється в загальному корпусі з акселерометром.

Відомі схеми побудови акселерометрів компенсаційного типу, які включають в себе чутливий елемент, перетворювач переміщень, підсилювач-перетворювач, електромагнітний перетворювач. У таких акселерометрах, а особливо в акселерометрах з опорами в'язкого тертя, коефіцієнт демпфірування при зміні температури змінюється в силу зміни в'язкості газу або рідини. Як показала практика відпрацювання акселерометрів компенсаційного типу температурне зміна навколишнього середовища впливає на амплітудно-фазові частотні характеристики (АФЧХ) акселерометра.

Тому постає завдання збільшення стабільності АФЧХ акселерометрів при широкому зміні температури навколишнього середовища, наприклад від 0 до 50°C.

Поставлена мета досягається тим, що до складу акселерометра компенсаційного типу, що містить чутливий елемент з рідинним демпфуванням рухомої частини, елементи системи зворотного зв'язку, в тому числі датчик переміщень (ДП), підсилювач-перетворювач (УП), додатково вводиться керований за коефіцієнтом посилення підсилювач, який включається послідовно в ланцюг між ДП та УП.

Вимірювані величини можуть характеризуватися тимчасовими, просторовими і кореляційними властивостями. Помилки датчиків не можна повністю виключити або зробити нескінченно малими. А прагнення отримати більше інформації неминуче веде або до втрати працездатності датчика, або до настільки великих енергетичних витрат, що може бути порушений сам

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	9

контрольований процес. Таким чином, світ датчиків - це багатовимірний простір проблем і можливих їх рішень. Більшість датчиків - контактні пристрої, тобто встановлюються вони безпосередньо на об'єкті в місцях виміру досліджуваних параметрів. Як правило, це місце одночасної концентрованої дії багатьох фізичних сил. Тому датчик має бути надійно механічно захищений від руйнівної дії цих сил, а також володіти селективністю по відношенню до вимірюваного параметра.

Взаємодія датчика з об'єктом вимірів - процес обопільний. Вимір коректний настільки, наскільки датчик, встановлений на об'єкті, не змінює фізичну картину процесу, що вивчається, і настільки, наскільки він здатний сприйняти і правильно відтворити зміну вимірюваного параметра в часі.

Окрім забезпечення гарантованих метрологічних характеристик впродовж всього терміну експлуатації, датчики по своїй механічній міцності повинні перевершувати об'єкт виміру. Їх маса, об'єм і струмопровідність мають бути по можливості мінімальними. Необхідно також, щоб вони були пожежобезпечними, перешкодостійкими, допускали багаторазове вживання, володіли електромагнітною сумісністю.

						Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.Огляд вимірювачів прискорень

Акселерометри відрізняються один від одного за принципом дії, габаритам, вазі, конструктивного оформлення, діапазону вимірюваних величин, чутливості і т. д. Однак при всьому їх різноманітті можна вказати основні ознаки, за якими акселерометри відрізняються один від одного.

1. За характером залежності між вимірюваним прискоренням і вихідним сигналом акселерометри бувають простими, одноразово інтегруючими і двократно інтегруючими.

2. За характером переміщення інерційної маси акселерометри можна розділити на дві групи:

- з лінійним переміщенням рухомої системи (лінійні акселерометри);
- з кутовим переміщенням рухомої системи (кутові акселерометри)

3. За способом підвісу інерційної маси (рухомий системи) акселерометри можна розділити на 4 групи:

- з пружинним підвісом рухомий системи;
- з механічним підвісом рухомий системи в жорстких опорах (на підшипниках кочення або ковзання, на призмах і т. д.);
- з гідравлічним (гідростатичним або гідродинамічним) підвісом рухомий системи;
- з комбінованим підвісом рухомої системи.

У подальших розділах даної глави розглянуті питання розрахунку і вибору параметрів деяких типів акселерометрів.

1.1. Маятникові акселерометри

Маятниковий акселерометр являється вимірювачем прискорень з кутовим переміщенням ЧЕ в системі координат, жорстко зв'язаній з корпусом приладу.

						Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

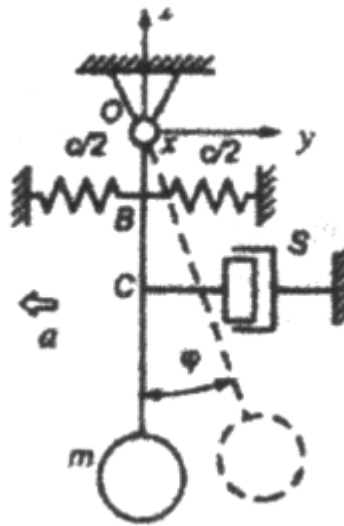


Рис. 1. Маятниковий акселерометр

Кінематична схема маятникового акселерометра представлена на рис. 1. Чутливим елементом являється плоский маятник, утворений інерційною масою m . Центр мас маятника віддалений від осі обертання на відстані l . Дві горизонтальні пружини з жорсткістю $c/2$ обмежують кути повороту маятника φ відносно осі Ox , яка проходить через точку O (перпендикулярно площині креслення). Маятниковий акселерометр, вимірює проекції прискорення на свою вимірювальну вісь, що співпадає з перпендикуляром до плеча маятника в нейтральному положенні ЧЕ (вісь Oy на рис. 1).

Рівняння руху ЧЕ акселерометра записується наступним чином:

$$\ddot{\varphi} + 2\xi\omega_0\dot{\varphi} + \omega_0^2 = \frac{mla_y}{I_x} \cos \varphi + \frac{mla_z}{I_x} \sin \varphi + \frac{M_x}{I_x} \quad (1.1)$$

де $\omega_0 = \sqrt{c'/I_x}$ - власна частота вільних незгасаючих коливань; $\xi = \frac{f}{2\sqrt{c'I_x}}$ - відносний коефіцієнт згасання; $s'=s|AC|^2$ - коефіцієнт кутового демпфування; $c'=c|AC|^2$ - кутова жорсткість пружини; a_y, a_z - складові прискорення на осі Oy і Oz відповідно; M_x - сукупність моментів випадкових сил.

Недоліком маятникових підвісів являється те, що при відхиленні маси прилад починає реагувати на складові прискорення a_z вздовж осі Oz , перпендикулярної осі чутливості Oy . При цьому внесок від складової a_y тим

						Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

більше, чим більший кут φ . Для виключення цього явища акселерометри з такими підвісами використовують в сполученні з силовою компенсацією.

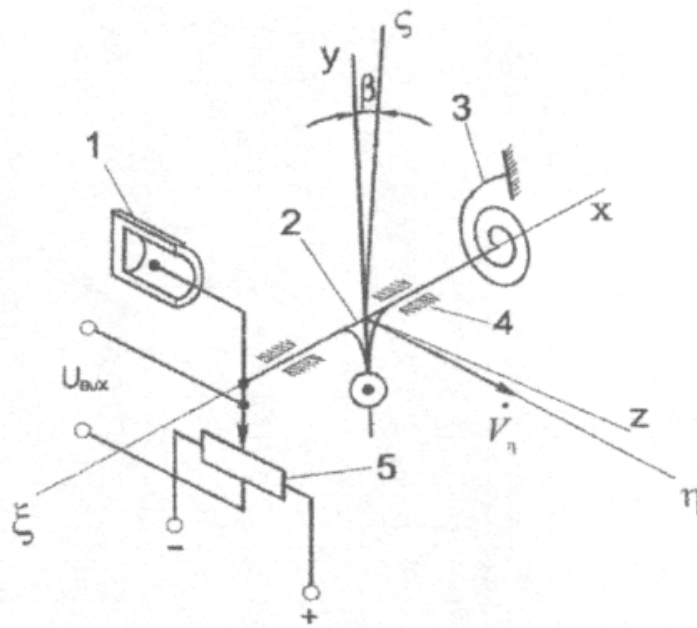


Рис. 2. Кінематична схема маятникового акселерометра

1-демпфер, 2-рухомий вузол, 3-пружина, 4-опора, 5-датчик кута

Кінематична схема маятникового акселерометра представлена на Рис. 2.

Рівняння руху рухливого вузла акселерометра відносно корпусу має вигляд:

$$J_{\xi} \ddot{\beta} + B \dot{\beta} + k\beta = ml \dot{V}_{\eta} \cos \beta + ml \dot{V}_{\zeta} \sin \beta + M_{\xi} \quad (1.2)$$

де J_{ξ} — момент інерції рухомого вузла; B — коефіцієнт кутового демпфування; k — кутова жорсткість пружини; ml — маятниковість рухомого вузла;

M_{ξ} — сума неврахованих шкідливих моментів, що діють по осі ξ (моменти тертя, тяжіння токопідводів и т. д.).

Для маятникового акселерометра $n_0 = \sqrt{k/J_{\xi}}$; $\xi = B/(2\sqrt{kJ})$. При малому β та $\dot{\beta} = \ddot{\beta} = 0$ для випадку $\dot{V}_{\eta} = \text{const}$ і $\dot{V}_{\zeta} = \text{const}$ рівняння (2) отримаємо:

$$\beta^* = \frac{1}{k - ml \dot{V}_{\zeta}} (ml \dot{V}_{\eta} + M_{\xi}) \quad (1.3)$$

$$U_{\text{вих}}^* = \frac{k_{\text{пп}}}{k - ml \dot{V}_{\zeta}} (ml \dot{V}_{\eta} + M_{\xi}) = h_{\eta \text{max}} \dot{V}_{\zeta} \quad (1.4)$$

					Арк.
					13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

де $k_{пп}$ - передатний коефіцієнт датчика сигналу акселерометра і підсилювально-перетворюючого пристрою (при його наявності).

Коефіцієнт $h_{\eta_{\max}}$, що характеризує відношення вихідного сигналу приладу до прискорення, що заміряється \dot{V}_{η} , називається поточною чутливістю приладу, чи крутизною його вихідної характеристики.

$$h_{\eta} = \frac{U_{\text{вихmax}}^*}{V_{\eta_{\max}}} \cdot , \text{ або } h_{\eta} = -U_{\text{вих}}^*(1g)/1g, \quad (1.5)$$

де $U_{\text{вих}}^*(1g)$ - вихідна напруга акселерометра, відповідна прискоренню $1g$.

Останнє рівняння відповідає випадку, коли проходить перед експлуатаційне калібрування акселерометра по прискоренню сили тяжіння.

1.2. Компенсаційні акселерометри

В цих приладах виконується автоматичне врівноваження сили інерції ЧЕ другою силою, яку можна створити і виміряти з необхідною точністю. Акселерометри подібного типу являють собою вимірювальну систему з від'ємним зворотним зв'язком, який дозволяє зменшити значення відносної похибки.

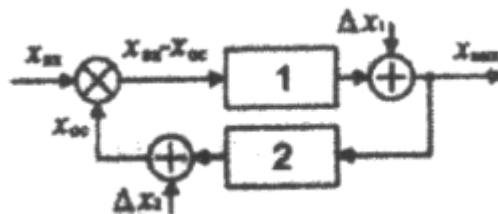


Рис. 3. Структурна схема компенсаційного акселерометра

Структурна схема компенсаційного акселерометра показана на рис. 3.

Передатний коефіцієнт системи за корисним сигналом запишемо у вигляді:

$$K = \frac{x_{\text{вих}}}{x_{\text{вх}}} = \frac{K_1}{1 + K_1 K_2} \quad (1.6)$$

де K_1 і K_2 - передатні коефіцієнти ланок прямого і зворотного зв'язку відповідно.

Якщо на виходах ланок 1 і 2 є похибки Δx_1 і Δx_2 , то при відсутності вхідного сигналу ($x_{\text{вх}} = 0$) результуюча похибка на виході буде:

					Арк.
					14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

$$x_{\text{вих}} = \Delta x_1 \frac{1}{1+K_1 K_2} - \Delta x_2 \frac{K_1}{1+K_1 K_2} \quad (1.7)$$

Поділивши ліву і праву частини рівняння (1.7) на $x_{\text{вих}}$ і враховуючи відношення $x_{\text{ос}} = K_2 x_{\text{вих}}$, отримаємо величину відносної похибки:

$$\delta = \frac{\Delta x_{\text{вих}}}{x_{\text{вих}}} = \delta_1 \frac{1}{1+K_1 K_2} - \delta_2 \frac{K_1 K_2}{1+K_1 K_2}, \quad (1.8)$$

де $\delta_1 = \frac{\Delta x_{\text{вих}}}{x_{\text{вих}}}$; $\delta_2 = \frac{\Delta x_{\text{вих}}}{x_{\text{ос}}}$ - відносні похибки ланок 1 і 2.

Відповідним вибором коефіцієнтів K_1 і K_2 можна управляти значенням результуючої похибки δ . За умов $K_1 K_2 \gg 1$, отримаємо $\delta \approx -\delta_2$, або $\Delta x_{\text{вих}} = -\Delta x_2$.

Таким чином, похибка прямого каналу (ланка 1) виявилась виключеною, а сумарна похибка тепер визначається тільки помилкою каналу зворотного зв'язку (ланка 2), яку в загальному випадку можна зробити достатньо малою.

Зменшення результуючих похибок акселерометра досягається ціною зниження його чутливості, яка пропорційна коефіцієнту передачі акселерометра. Із виразу (1.6) видно, що завжди виконується нерівність $K < K_1$ тобто при введенні від'ємного зворотного зв'язку коефіцієнт передачі акселерометра зменшується.

1.3. Осьові акселерометри

Акселерометри призначаються для вимірювання прискорень рухомих об'єктів і для перетворення цих прискорень в сигнал, який використовується для визначення параметрів траєкторії руху об'єкта або для цілей автоматичного управління цією траєкторією.

Акселерометри застосовуються для вимірювання лінійних і кутових прискорень. Відповідно до цього вони називаються лінійними акселерометрами або кутовими акселерометрами.

За призначенням розрізняють наступні акселерометри: для візуального контролю, для систем телеметричного контролю, для систем інерційної навігації, для систем автоматичного управління.

За виконанням акселерометри поділяються на наступні дві групи:

- пружинні, побудовані по розімкнутої структурній схемі;

					Арк.
					15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

- компенсаційні, побудовані по замкнутій структурній схемі.

Компенсаційні акселерометри, в свою чергу, діляться на акселерометри з позиційної зворотним зв'язком (акселерометри з «електричною пружиною»), зі швидкісним зворотним зв'язком (інтегруючі акселерометри) і зі зворотним зв'язком по прискоренню (акселерометри з подвійним інтегруванням). Акселерометри виконують з безперервним вихідним сигналом або з дискретним.

Найбільш широке застосування акселерометри отримали на літальних апаратах. Як лінійне, так і кутове прискорення рухомого в просторі літального апарату можна в кожен момент часу розкласти на три складові в системі координат, пов'язаної з літальним апаратом і орієнтованої на його головні осі (осі симетрії).

Для отримання повної інформації про лінійних і кутових прискорень літального апарату необхідно мати шість акселерометрів (три лінійних і три кутових), вимірювальні осі яких орієнтовані по головних осях літального апарату і кожен з яких вимірює відповідний компонент лінійного або кутового прискорення.

У системах автоматичного керування траєкторією польоту іноді використовують не повну інформацію, а лише деяку її частину, наприклад обмежуються застосуванням двох лінійних акселерометрів, що вимірюють компоненти лінійних прискорень по поперечним осях літального апарату.

При використанні акселерометрів в системах інерційної навігації застосовують два лінійних акселерометра, вимірювальні осі яких орієнтовані по двох взаємно перпендикулярним напрямкам, які лежать в горизонтальній площині, причому один із напрямів зазвичай поєднують з площиною географічного меридіана. Можливі й інші способи орієнтації вимірювальних осей акселерометрів в залежності від обраної системи координат.

Основним конструктивним вузлом МА є ЧЕ, принципові схеми яких наведені на рис. 4. ЧЕ включає в себе ІМ 1, пружні елементи 2 підвісу і опорну рамку 3.

ЧЕ, представлені на рис. 4, а, б, мають дві пари пружних елементів хрестоподібно розташованих уздовж осей x , z , початок яких (осей) знаходиться в геометричному центрі пластин ІМ. ЧЕ за схемою 4, б може бути виготовлений з

						Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

меншою жорсткістю підвісу в напрямку осі, перпендикулярної до площини xz . Осі чутливості цих ЧЕ збігаються з віссю y , а підвіси ІМ можуть бути визначені як хрестоподібні.

ЧЕ, показані на рис. 4, в, г, д, містять по дві пари пружних елементів. Пружні елементи кожної пари паралельні однією з осей x , g і розташовані або уздовж протилежних краєвих пластин ІМ (рис. 4, в), або паралельних кройках (рис. 4, г, д). Ці підвіси можуть бути названі z -подібними. Між ними є різниця, яка визначається місцем з'єднання пружного елемента з пластиною ІМ. На рис. 1.1, в, г пружні елементи своїми рухливими кінцями пов'язані з кутами пластин ІМ (кососиметрично відносно геометричного центру пластин), а в схемі 4, е - з центрами пластин (симетрично відносно геометричного центра пластини).

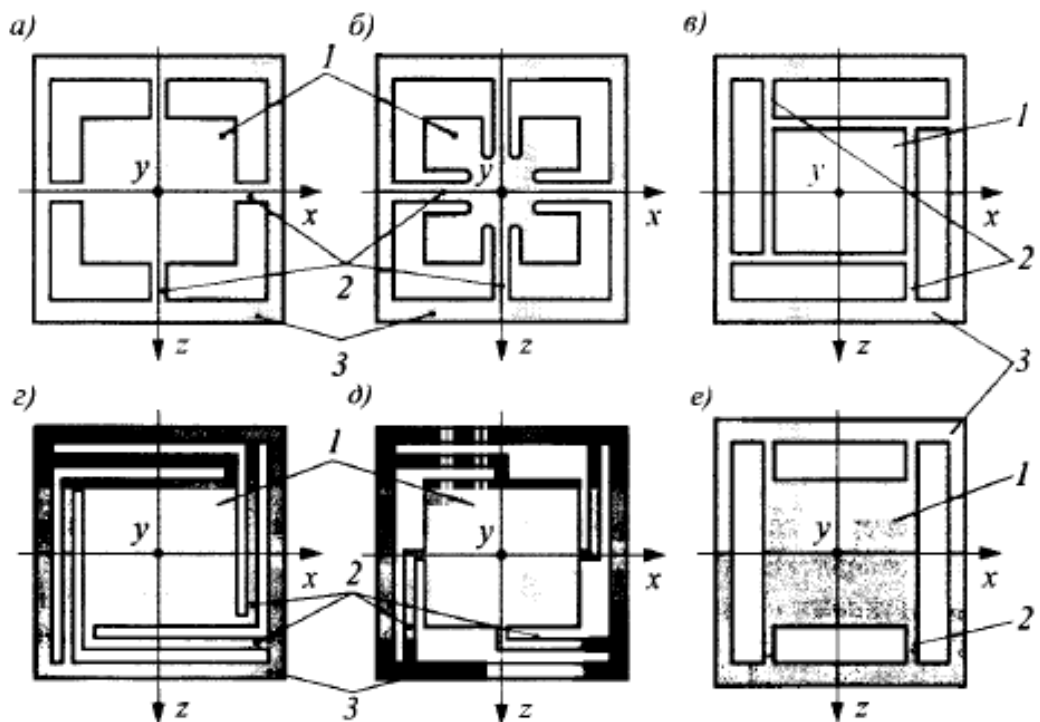


Рис 4. Принципові схеми ЧЕ осевих МА:

а, б – ЧЕ із хрестоподібним підвісом; в, г – ЧЕ із z -подібним кососиметричним підвісом; д - ЧЕ із z -подібним симетричним підвісом; е - ЧЕ із паралельним підвісом; 1 – ІМ; 2 – пружні елементи; 3 – опорна рамка.

Таким чином, підвіси ІМ по рис. 4, в, г можуть бути визначені як g - образні кососиметричні, а по рис. 4, д - як g -образні симетричні. ЧЕ за схемами 4, в, г, д

мають осі чутливості, що збігаються з віссю у. Очевидно, що геометричні розміри пружних елементів підвісів за схемами 4, г, д можуть бути підібрані так (особливо це відноситься до схеми 1.1, д), що ІМ буде чутлива до прискорення уздовж будь-якої з осей x , y , z . Таким чином, можливо побудова одно-, дво- і трикомпонентної МА на одному ЧЕ. ЧЕ по схемі 4, е може мати вісь чутливості, що збігається з віссю y або x .

Розглянемо опис деяких конструкцій МА, ЧЕ яких реалізовані за схемами, наведеними на рис. 4.

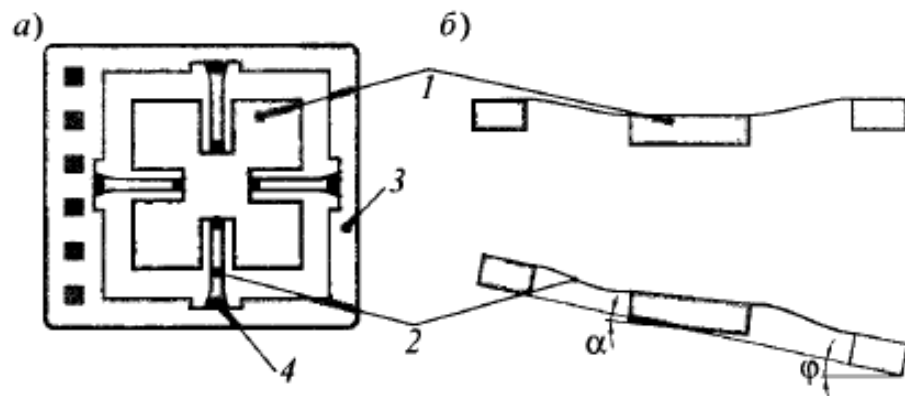


Рис. 5. Мікромеханічний нахиломір:

а – схема нахиломіра; б – принцип виміру(нахил датчика на кут φ відносно рамки датчика); 1 - ІМ; 2 – пружні елементи (балки) підвісу; 3 – опорна рамка; 4 – п'єзорезистори.

Фірма Endevco (США) випускає осьовий акселерометр з ємнісним перетворювачем переміщень в габаритних розмірах 25x16x10 мм, ЧЕ якого виконаний по рис. 4, б. Діапазон вимірів: 0,5...10 g. Демпфування - газодинамічне. Смуга пропускання частот до 1000 Гц. Точність в залежності від замовлення і вартості: 5, 1 і 0,1% від максимального діапазону.

Подібна схема ЧЕ покладена в основу мікромеханічного нахиломіри, схема якого наведена на рис. 5, а.

ІМ 1 прикріплена чотирма тонкими кремнієвими балками 2 до опорної рамки 3. Балки розташовані в межах маленьких проміжків ІМ. Чутливість

збільшується разом з довжиною підтримуючих балок і досягає максимуму для деякого відношення довжини до розміру ІМ.

Як принцип перетворення обраний п'єзореzystивного ефект, що призводить до відносним змін сигналу від нахилу, які приблизно на 60% більше, ніж для ємнісного знімання тієї ж самої інформації.

Принцип вимірювання показаний на рис. 5, б. Кут нахилу може бути витягнутий з вихідного сигналу двох повних мостів Вітстона. Нахил датчика навколо однієї осі викликає S-подібне викривлення тих балок, які орієнтовані перпендикулярно до осі нахилу. Балки, паралельні осі нахилу, реагують на кутові навантаження.

						Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Розрахунок та проектування акселерометра

2.1. Вибір конструктивної схеми

Добротність приладу 10^5 . Відповідно до цього значення добротності вибираємо схему акселерометра. В даному випадку вибираємо компенсаційний акселерометр з електричною пружиною. Він застосовується, коли добротність, що задається, перевищує $(1-2) \cdot 10^2$ і коли пред'являються жорсткі вимоги по забезпеченню стабільності нуля та лінійності вихідної характеристики акселерометра $\delta\eta_{\text{доп}} < 0,5\%$. Велика жорсткість електричної пружини забезпечує малий кут α (максимальний кут відхилення ЧЕ акселерометра) та похибки які виникають внаслідок цього кута, а також високу частоту власних коливань, і збільшення за рахунок цього динамічного діапазону вимірювань. Підсилювач і датчик моменту утворюють електричну пружину. Вихідним сигналом акселерометра є струм I , який подається на датчик моменту.

Акселерометри цього типу володіють вібростійкістю до $15g$ і мають наступні основні параметри: поріг чутливості $10^{-5} g$; діапазон вимірюваних прискорень $1 \dots 20 g$; масштабний коефіцієнт $1 \pm 0,1 \text{ mA/g}$.

Виберемо пружній підвіс, оскільки такі підвіси використовують в приладах, рухомі частини яких повертаються на незначні кути, а сам характер їх руху носить коливальний характер, що підходить нашій вибраній схемі акселерометра, характерною рисою всіх типів пружних підвісів є відсутність моментів сил сухого тертя. Момент протидії в них практично залежить тільки від кута повороту рухомої частини.

Розрахуємо габаритні характеристики, при цьому врахуємо, що середня питома вага сучасних акселерометрів $\gamma_a = (4.5 \div 5.5) \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$.

Тоді об'єм приладу:

$$V_a = \frac{G_a}{\gamma_a} = \frac{2H}{5.5 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3} = 0.36 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3, \text{ де } G_a - \text{ вага приладу.}$$

					Арк.
					20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

При визначенні площі поверхні акселерометра враховують, що раціонально спроектований акселерометр має вигляд циліндра, спроектуємо його так, щоб його довжина L приблизно у два рази була більшою за його діаметр D .

Тоді:

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{2V_a}{\pi}} = 0.028 \text{ м}$$

$$L_a = 2D_a \approx 0.06 \text{ м}$$

$$S_a = 2.5\pi D_a^2 = 6.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Допустима потужність, що виділяється елементами акселерометра:

Робочу температуру приладу вибираємо рівною 60°

$$P_{a\max} = k_1 \alpha_1 S_a (t_{p\max} - t_{c\max}) = 1.2 \cdot 7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}} \cdot 6.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot (60 - 50) =$$

0,52 Вт (1)

$t_{c\max}$ - максимальна температура довкілля,

$t_{p\max}$ - максимально допустима робоча температура приладу,

k_1 - коефіцієнт теплопередачі, через зони кріплення (1.2-1.5)

α_1 - коефіцієнт теплопередачі.

Розрахункове значення P_a вибирається як 0.8 - 0.9 від отриманого по формулі (1) (такий запас необхідний для забезпечення роботи системи термостатування).

$$P = 0.8 \cdot P_a = 0.8 \cdot 0.52 = 0.42 \text{ Вт}$$

При визначенні потужності, що приходить на датчик моменту приладу $P_{д.м.}$, необхідно враховувати, що потужність, що виділяється останніми елементами акселерометра (датчик кута, датчик моменту), для раціонально спроектованих приладів не перевищує 10% від загальної потужності.

$$P_{д.м.} = 0.8 \cdot P = 0.8 \cdot 0.42 = 0.34 \text{ Вт}$$

Вага датчика моменту складає 40% від загальної ваги акселерометрів:

$$G_{д.м.} = 0.4 \cdot G_{\Pi} = 0.4 \cdot 2 = 0.8 \text{ Н}$$

Максимальний момент від датчика моменту:

$$M_{\max} = G_{д.м.} \cdot \sqrt{P_{д.м.}} = 0.8 \cdot \sqrt{0.34} = 47 \cdot 10^{-2} \text{ Нм}$$

						Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Маятниковість рухливого вузла акселерометра: $k_1=1 \div 2$ для акселерометрів.

$$m_l = \frac{M_{\max} k_1}{V_{\eta \max}} = \frac{47 \cdot 10^{-2} \text{ Нм} \cdot 1}{10g} = 4.8 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}$$

Визначимо крутизну тракту, вона знаходиться допустимою похибкою від наявності перехресного прискорення

$$k = \frac{m_l V_{\zeta \max}}{[\delta \dot{V}_{\zeta}]_{\text{доп}}} = \frac{4.8 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot 10 \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{10^{-3}} = 47 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$[\delta \dot{V}_{\zeta}]_{\text{доп}}$ - похибка від наявності перехресного прискорення.

Максимальний кут нахилу рухомого вузла акселерометра:

$$\alpha_{\max} = \frac{m_l V_{\eta \max}}{k} = \frac{4.8 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot 10 \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{47 \text{ Н} \cdot \text{м}} = 0.001 \text{ рад} \approx 0.06^\circ$$

$$\alpha_{\max} \approx \mp 4'$$

2.2. Розрахунок чутливого елемента

2.2.1. Опис роботи ЧЕ

Маятниковий ЧЕ складається з ІМ, пружного підвісу та рухливого електрода ємнісного датчика переміщення, з'єднаного з ІМ. Під дією прискорення а, ІМ та з'єднаний з нею рухомий електрод відхиляється на кут α від положення рівноваги у бік, протилежний дії прискорення. Це відхилення відбувається між нерухомими електродами ємнісного датчика переміщення. Враховуючи малість кута відхилення α , рух інерційної маси можна розглядати не по дузі, а по прямій лінії. Чутливий елемент акселерометра є масою на пружному підвісі, який оформлений у вигляді балки, що працює на вигин.

						Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

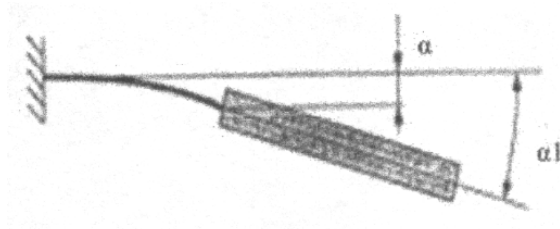


Рис. 6. Рух чутливого елемента

Момент сили інерції, що діє на ЧЕ дорівнює:

$$M_{IH} = I_M \alpha \quad (2.1)$$

де M_{IH} – момент сили інерції, I_M - плече прикладання сили $F_{IH} = \alpha$ відносно точки підвісу ЧЕ.

Дія M_{IH} на ІМ викликає її відхилення від врівноваженого положення. При відхиленні ІМ на неї діє момент сили пружності деформованого підвісу $M_{пр}$ та прагне повернути ІМ в врівноважене положення. Ємнісний датчик переміщення ІМ сприймає відхилення ІМ на кут α і виробляє напругу пропорційну цьому відхиленню. Напруга прикладається до перетворювача напруги, формуючи зрівноважуючий струм $I_{зр}$, що подається на котушку магнітоелектричного датчика моментів. При цьому струм $I_{зр}$ подається таким чином, щоб момент

$$M_{зр} = I_F F_{зр} \quad (2.2)$$

I_F - плече прикладання сили

сила $F_{зр}$ є силою Ампера і визначається формулою:

$$F_{зр} = 2BL_{\Pi} I_{зр} \quad (2.3)$$

де B - індукція в зазорах магнітних систем;

L_{Π} - довжина проводу в кожній котушці.

Роботу акселерометра можна описати рівнянням:

$$M_{IH} = M_{зр} + M_{пр} \quad (2.4)$$

де $M_{пр}$ - момент сили пружності деформованого підвісу ІМ ЧЕ;

$$M_{зр} = G_a \alpha \quad (2.5)$$

G_a - кутова жорсткість підвісу.

Як правило $M_{зр} \gg M_{пр}$, тоді з урахування (2), (3), M_{IH} прийме наступний вигляд

					Арк.
					23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

$$2BL_{\Pi} I_{зр} I_F = l_M m \alpha \quad (2.6)$$

звідки

$$I_{зр} = \frac{l_M m}{2l_P B l_{\Pi}} \alpha \quad (2.7)$$

З формул (6) і (7) можна зробити висновок, що значення вимірюваного прискорення α залежить від величини і напрямку струму.

2.2.2. Розрахунок ЧЕ

При розрахунку маси вважатимемо, що центр тяжіння рухомого вузла акселерометра знаходиться на одній лінії з точкою дії компенсуючої сили датчика, тоді масу рухомої частини можна виразити через максимальне зусилля, що створюється зворотним компенсаційним перетворювачем.

$$F_{зр} = F_{ін}$$

$$2I_F B L_{\Pi} I_{зр} = l_M m \alpha_{\max}$$

де α_{\max} - максимальна границя вимірювання прискорень.

Оскільки ми вважали, що центр тяжіння рухомого вузла акселерометра знаходиться на одній лінії з точкою дії компенсуючої силою датчика, то $I_F = L_{\Pi}$, тоді (3.6) матиме вигляд

$$2B l_{др} I_{гр} = m a_{\max} \quad (2.8)$$

$l_{др} = l_{\Pi}$ - довжина проводу на робочій ділянці котушки.

Маса чутливого елемента складається з маси пластини $m_{пл}$ і мас двох котушок $2m_k$

$$m = m_{пл} + 2m_k \quad (2.9)$$

$$m_{пл} = \rho_{кв} \cdot V_{пл} \quad (2.10)$$

$$m_k = l_{др} \cdot S_{др} \cdot \rho_{др} \cdot k_1 \quad (2.11)$$

$\rho_{кв}$ - густина кварцу,

$\rho_{др}$ - густина міді,

$l_{др}$ - довжина дроту ,

					Арк.
					24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

$S_{\text{др}}$ - площа поперечного перерізу дроту,

$$V_{\text{пл}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{ср}}^2}{4} \cdot h \quad (2.12)$$

$D_{\text{ср}}^2$ - середній діаметр пластини,

h - товщина пластини.

Підставивши (3.12) в (3.10) отримаємо масу пластини.

Числові значення параметрів:

$$\rho_{\text{кв}} = 2.65 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, h = 10^{-3} \text{ м}, D_{\text{ср}} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$m_{\text{пл}} = \rho_{\text{кв}} \frac{\pi \cdot D_{\text{ср}}^2}{4} \cdot h = 2,65 \cdot 10^3 \cdot \frac{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-4}}{4} \cdot 10^{-3} = 0.83 \cdot 10^{-3} \text{ (кг)}$$

Підставивши вирази (3.10) та (3.11) у (3.9) отримаємо масу чутливого елемента:

$$m = \rho_{\text{кв}} \frac{\pi \cdot D_{\text{ср}}^2}{4} \cdot h + 2 \cdot l_{\text{др}} \cdot S_{\text{др}} \cdot \rho_{\text{др}} \cdot k_1 \quad (2.13)$$

Підставивши вираз (3.13) у вираз (3.8) отримаємо:

$$2 \cdot B \cdot l_{\text{др}} \cdot I_{\text{зр}} = \rho_{\text{кв}} \frac{\pi \cdot D_{\text{ср}}^2}{4} \cdot h + 2 \cdot l_{\text{др}} \cdot S_{\text{др}} \cdot \rho_{\text{др}} \cdot k_1 \cdot \alpha_{\text{max}}$$

Звідси

$$l_{\text{др}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{ср}}^2 \cdot h \cdot \rho_{\text{кв}} \cdot \alpha_{\text{max}}}{8(B \cdot I_{\text{зр}} - S_{\text{др}} \cdot \rho_{\text{др}} \cdot k_1 \cdot \alpha_{\text{max}})} \quad (2.14)$$

$$D_{\text{ср}}^2 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; h = 10^{-3} \text{ м}; S_{\text{др}} = 10^{-10} \text{ м}^2; \alpha_{\text{max}} = 98 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}; k_1 = 1.3;$$

$$B=0.5 \text{ Тл}; I_{\text{зр}} = 0.03 \text{ А}; \rho_{\text{кв}} = 2.65 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \rho_{\text{др}} = 8.95 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; l_{\text{др}} \approx 5.4 \text{ м}$$

Знаючи довжину дроту, знайдемо масу котушки:

$$m_{\text{к}} = l_{\text{др}} \cdot S_{\text{др}} \cdot \rho_{\text{др}} \cdot k_1 = 5.4 \cdot 10^{-10} \cdot 8.95 \cdot 10^3 \cdot 1.3 = 6.2 \cdot 10^{-6} \text{ (кг)}$$

$$m = m_{\text{пл}} + 2m_{\text{к}} = 0.83 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 6.2 \cdot 10^{-6} = 0.84 \cdot 10^{-3} \text{ (кг)}$$

2.3. Розрахунок пружного підвісу ЧЕ

2.3.1 Розрахунок кутової жорсткості підвісу

						Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підвіс має жорстку частину, де закріплені котушки оберненого магнітного перетворювача, та тонку шийку (рис.5). Вага рухомої частини складається з ваги пружного елемента та ваги двох котушок. Сила, яка діє на пружний підвіс - сила ваги та сила інерції, обумовлена дією лінійних прискорень руху основи.

Дослідимо спочатку умови міцності пружного підвісу

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} \quad (2.15)$$

де W - момент опору перерізу пружної частини підвісу довжиною $l_{\text{пр}}$;

M_{\max} - максимальний згинаючий момент.

З урахуванням геометричних розмірів пружної частини момент опору перерізу $W = 2bh^2/6$, а максимальний згинаючий момент $M_{\max} = F(l_{\text{ц}} + l_{\text{п}})$.

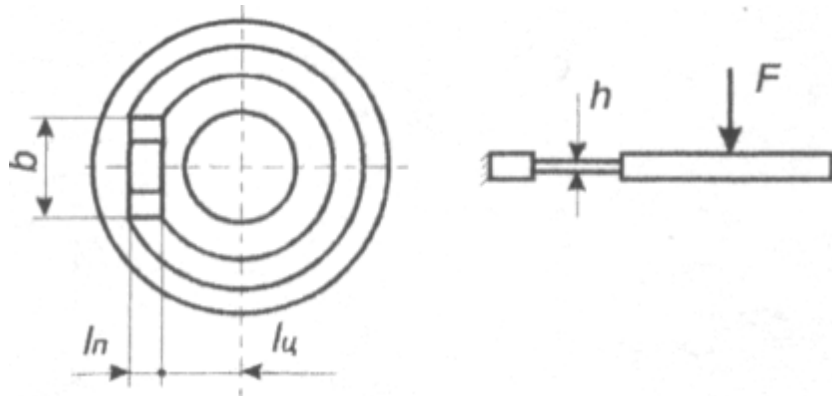


Рис. 7. Чутливий елемент

Таким чином, умову міцності можна записати так:

$$\sigma_{\max} = \frac{3F(l_{\text{ц}} + l_{\text{п}})}{bh^2} = \frac{3mW_{\text{Аmax}}(l_{\text{ц}} + l_{\text{п}})}{bh^2}, \quad (2.16)$$

де $W_{\text{Аmax}}$ - максимальне прискорення руху основи; m - маса рухомої частини.

Визначимо тепер прогин підвісу в точці прикладання сили F . Для цього використаємо інтеграл Мора. Відзначимо, що пружний підвіс можна розділити на дві частини: перша довжиною $l_{\text{п}}$ з кінцевою жорсткістю та друга довжиною $l_{\text{ц}}$, деформаціями якої можна знехтувати.

Згідно з прийнятою методикою одержимо

$$\delta = \frac{F}{El_{\Pi}} \int_{l_{\Pi}}^{l_{\Pi}+l_{\Pi}} x^2 dx + \frac{F}{El_{\Pi}} \int_0^{l_{\Pi}} x^2 dx \approx \frac{4mW_A l_{\Pi}}{Eb h^2} (3l_{\Pi}^2 + 3l_{\Pi}l_{\Pi} + l_{\Pi}^2) \quad (2.17)$$

Кут повороту недеформованої частини в точці прикладання сили F:

$$\alpha \approx \frac{6mW_A l_{\Pi}}{Eb h^3} (l_{\Pi} + 2l_{\Pi}) \quad (2.18)$$

Розрахуємо σ_{\max} та δ_{\max} ; $m=0.84 \cdot 10^{-3}$ (кг); $l_{\Pi} = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $l_{\Pi} = 5,2 \cdot 10^{-3}$ м; $b = 6 \cdot 10^{-3}$ м; матеріал підвісу - кварц з такими параметрами: модуль пружності $E = 7.3 \cdot 10^{10}$ Па; межа міцності $[\sigma] = 2.89 \cdot 10^8$ Па; параметри перевантажень:

$$W_{A\max} = 15g; W_{A\min} = 10^{-5}g$$

Забезпечити потрібну чутливість (тобто мінімальну величину вимірюваного прискорення) можна тільки за умови зміщення δ_{\min} чутливого елемента щонайменше на 0,0001 мм при дії мінімального прискорення.

Визначимо максимальну товщину шийок підвісу, яка забезпечує потрібну чутливість акселерометра:

$$h_{\max} \leq \sqrt[3]{\frac{4mW_{A\min}l_{\Pi}(3l_{\Pi}^2 + 3l_{\Pi}l_{\Pi} + l_{\Pi}^2)}{Eb\delta_{\min}}} \quad (2.19)$$

Підставивши значення отримаємо:

$$h_{\max} \leq \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 0.84 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot (3 \cdot 5.2^2 + 3 \cdot 5.2 \cdot 2 + 2^2) \cdot 10^{-3}}{7.3 \cdot 10^{10} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-7}}}$$

$$h_{\max} \leq 5.8 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

Під дією максимального прискорення підвіс може бути зруйнований. Тому в конструкції слід передбачити упори, на які спирається чутливий елемент при граничних перевантаженнях ($W_{\text{доп}} = 15g$).

На підставі виразу (3.18) визначимо кутову жорсткість підвісу:

						Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$G_{\alpha} = \frac{2 \cdot E \cdot b \cdot h^3 \cdot l_M}{12 \cdot l_M (l_{\Pi} + 2 \cdot l)} \quad (2.20)$$

$$l_M = l_{\Pi} + l_{\text{ц}} + l \approx 13.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$G_{\alpha} = \frac{2 \cdot 7.3 \cdot 10^{10} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 195 \cdot 10^{-12} \cdot 13.2 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 13.2 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 6 \cdot 10^{-3})} = 1.02 \cdot 10^{-3} \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

2.3.2 Вибір жорсткості електричної пружини

Вибір жорсткості електричної пружини проведемо, виходячи із забезпечення необхідних величин статичних методичних похибок акселерометра δ_m із наявності кінцевої жорсткості пружного підвісу ІМ ЧЕ і від впливу невимірюваних кінематичних параметрів руху підстави.

Прийmemo, що величина статичних і методичних похибок $\delta^y \leq 0.01\%$ і $\delta^k(a_i^0) \leq 0.1\%$, тоді для величин жорсткості електричної пружини повинна виконуватися умова

$$G_{\beta} \geq 2 \cdot 10^4 G_{\alpha}$$

$$G_e = 2 \cdot 10^4 \cdot 1.02 \cdot 10^{-3} \geq 20.4 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

З іншої сторони максимальне значення електричної пружини $G_e \leq \frac{M_{\min}}{\alpha_{\max}}$, де

$$M_{\min} = mlW_{\min}; G_e \leq 79.38 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

2.4. Розрахунок датчика переміщень

Конфігурацію рухливих електродів ємнісного датчика вибираємо відповідно до форми рухливої частини маятника. Частина рухливого електрода перекривається з пластинкою і забезпечує вимірювальну ємність C_x .

Розіб'ємо площину частини електрода, що перекривається, на сектори висотою у напрямку вісі. Довжина їх у напрямку вісі X:

$$B = \sqrt{R_1^2 - (x - x_0)^2} - \sqrt{R_2^2 - (x - x_0)^2} \quad (2.21)$$

						Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Площа перекриття електродів ємнісного датчика та ємність у залежності від кута відхилення рухомого електрода складає:

$$S = \int_{x_0}^{x_0+R} B(x) dx = \int_{x_0}^{x_0+R} [\sqrt{R_1^2 - (x - x_0)^2} - \sqrt{R_2^2 - (x - x_0)^2}] dx; \quad (2.22)$$

$$S = 0.5\pi(R_1^2 - R_2^2)$$

$$C_x = \int_{x_0}^{x_0+R} \frac{\epsilon_0 \epsilon B(x) dx}{d \pm \alpha x}$$

При апроксимації підково - видної форми зони перекриття електродів прямокутником такої ж площі, закон зміни ємності від кута відхилення має вигляд:

$$C_x(\alpha) = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{\alpha(x_0 + R)} \ln \left[\frac{d + \frac{1}{2} \alpha(x_0 + R)}{d - \frac{1}{2} \alpha(x_0 + R)} \right] \quad (2.23)$$

Зону рівноваги можна представити лінійною залежністю:

$$C_1 = C_0 \left(1 + \frac{\alpha}{2\alpha_{\max}} \right) \quad (2.24)$$

$$C_2 = C_0 \left(1 - \frac{\alpha}{2\alpha_{\max}} \right)$$

де $\alpha_{\max} = \frac{d}{x_0 + R}$ - максимальний кут відхилення маятника.

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}; \quad (2.25)$$

$$\alpha \approx 4'$$

Тоді чутливість ємнісного датчика в околі точки рівноваги складає:

$$\frac{d(C_1 - C_2)}{d\alpha} = \frac{C_0}{\alpha_{\max}} \quad (2.26)$$

$$\frac{d(C_1 - C_2)}{d\alpha} = \frac{C_0}{\alpha_{\max}} \quad (2.26)$$

						Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 8. Ємності датчика кута

При $\varepsilon = 1$; $\varepsilon = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Нм}^2}$; $R_1 = 6\text{мм}$; $R_2 = 5\text{мм}$; $d = 0.02\text{ мм}$;

$$S = 20.5 \text{ мм}^2$$

$$C_0 = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 20.5 \cdot 10^{-6}}{0.02 \cdot 10^{-3}} = 9.1 \text{ пФ};$$

$$\frac{d(C_1 - C_2)}{d\alpha} = \frac{C_0}{\alpha_{\max}} = \frac{9.1 \cdot 10^{-12}}{0.001} = 9100 \frac{\text{пФ}}{\text{рад}}.$$

Стосовно до конструкції акселерометра, що розробляється, можна прийняти такі геометричні розміри однієї пластини ємкісного датчика:

- Початковий зазор між пластинами $d = 0.02\text{ мм}$
- Зовнішній і внутрішній радіуси пластини $R_{\text{зовн}} = 6\text{мм}$; $R_{\text{внутр}} = 5\text{мм}$;
- Площа однієї пластини $S = 20.5 \text{ мм}^2$
- Початкова ємкість конденсатора 9 пФ при значенні діелектричної проникності

$$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / \text{Нм}^2$$

- Чутливість ємкісного датчика приблизно 9100 пФ/рад

					Арк.
					30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

2.5 Розрахунок датчика моменту

Датчиком моменту був обраний магнітоелектричний датчик. Завдання проектування магнітної системи полягає в такому підборі розмірів і матеріалу магніта і магнітопровода, при яких задана індукція в зазорі створюється магнітом мінімального об'єму.

Розрахунок магнітної системи проводиться в два етапи:

- розрахунок котушки
- розрахунок необхідного об'єму магніта.

Для розрахунку геометричних параметрів котушки використовуємо наступні розрахункові дані, використані при розрахунку інерційно-масових характеристик чутливого елементу:

тип дроту

- ПЕТВ2СС (діаметр дроту в ізоляції $d_{із}=0.042\text{м}$ перетин дроту $S_{пр}=10^{-10}\text{м}^2$);

довжина дроту $l_{др}=5.4\text{ м}$;

- середній діаметр котушки $d_{к.ср.}=8\text{мм}$,
- висота котушки $h=2\text{ мм}$,
- коефіцієнт заповнення дроту $k_{зат}=0.9$

Розрахунок проводиться в такому порядку:

Знайдемо довжину витків котушки:

$$l_v = d_{к.ср.} \cdot \pi = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 3.14 = 0.025 \text{ (м)} \quad (2.27)$$

По заданих значеннях $l_{др}$ і $d_{к.ср.}$ визначаємо кількість витків в котушці:

$$n = \frac{l_{др}}{l_v} = \frac{5.4}{0.025} = 216 \text{ витка} \quad (2.28)$$

Орієнтовне значення числа шарів намотування N визначаємо виходячи з кількості витків n_1 в одному шарі

$$n_1 = \frac{k_{зат} \cdot h}{d_{др}} = \frac{0.9 \cdot 2}{0.042} = 42 \text{ витка} \quad (2.29)$$

$$n_1 = \frac{k_{зат} \cdot h}{d_{др}} = \frac{0.9 \cdot 2}{0.042} = 42 \text{ витка} \quad (2.29)$$

					Арк.
					31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Число шарів обмотки котушки:

$$N = \frac{n}{n_1} = \frac{216}{42} = 6 \quad (2.30)$$

Висота навивки дроту

$$h_{\text{нав}} = n_1 \cdot d_{\text{др}} \cdot k_{\text{зап}} = 42 \cdot 0.042 \cdot 0.9 = 0.0015 \text{ (мм)} \quad (2.31)$$

Підсумуємо кінцеві результати:

- Довжина витків $l_v = 0.025(\text{м})$;
- Кількість витків в котушці $n = 42$ витка;
- Число шарів обмотки $N = 6$;
- Висота навивки дроту $h_{\text{нав}} = 0.0015 \text{ (м)}$.

Розрахуємо необхідний об'єм магніту по формулі:

$$V^2 = \frac{F^2 \rho}{P_{\text{пит}} \theta} \cdot \frac{\mu_m}{(B_m H_m)_{\text{max}} \cdot \mu_0^2} \cdot \frac{4\delta_K}{K_1^2 K_2^2 K_{\text{зап}}} \quad (2.32)$$

де B_m і H_m -індукція і напруженість в матеріалі магніта, розміри якого вибираються так, щоб $B_m = B_D$; $H_m = H_D$, тобто відповідали координатам екстремальної точки кривої розмагнічування, яке визначає для даного матеріалу максимум **ВН**; $\mu_m = B_m/H_m$; δ_K — конструктивна довжина зазору, який визначається товщиною каркасу і двома технологічними зазорами і вибирається мінімально можливою (довжина активного зазору δ_0 при цьому вибирається рівною δ_K);

$K_1 = \frac{S_{\text{кот}}}{S_n}$ і $K_2 = \frac{S_n}{S_m}$ — коефіцієнти, які визначаються відношенням площин бічної

поверхні котушки $S_{\text{кот}}$ полюси S_n і магніта S_m і за величиною близькі до 1.

На основі експериментальних досліджень для ряду датчиків сили питома потужність розсіяння дорівнює $P_{\text{пит}} = 100 \text{ Вт/Км}^2$.

Допустима температура перегрівання θ залежить від допустимої погрішності датчику і найчастіше дорівнює $\theta = 2^\circ \dots 10^\circ \text{ С}$.

Числові дані для розрахунку:

матеріал магніта ЮНДК35Е5БА, $(B_m H_m) = 64500 \text{ Вб/м}^2 \cdot (\text{а/м})$;

$\rho = \rho_{\text{міді}} = 1.71 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $P_{\text{пит}} = 100 \text{ Вт/Км}^2$; $\theta = 2^\circ \text{С}$;

					Арк.
					32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

$$\mu_M = 2.57 \cdot 10^{-5} \text{ Гн/м}; \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}; \delta_K = 0.7 \text{ мм}; K_{\text{зап}} = 0.35$$

$$k_{\pi} = 0.95; k_M = 0.8; F = 1H.$$

За формулою (3.32) визначимо об'єм магніта

$$V_M^2 = \frac{1 \cdot 1.71 \cdot 10^{-8}}{100 \cdot 2} \cdot \frac{1.12 \cdot 10^{-5}}{64.5 \cdot 10^3 \cdot (4 \cdot 3.14)^2 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{4 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3}}{0.95^2 \cdot 0.8^2 \cdot 0.35}$$

$$= 1.31 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3$$

$$\text{Звідси } V_M = 11.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

Знаходимо геометричні розміри магніту (довжину L та діаметр D) виходячи з того, для раціонально спроектованої магнітної системи $L=2D$.

$$D_M = \sqrt[3]{\frac{2V_M}{\pi}} = 0.02 \text{ м}$$

$$L=0.04 \text{ м}$$

						Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Розрахунок похибок акселерометра

Розглянемо вплив технологічних похибок на коефіцієнти кутової жорсткості пружного підвісу щодо його робочої осі Oz.

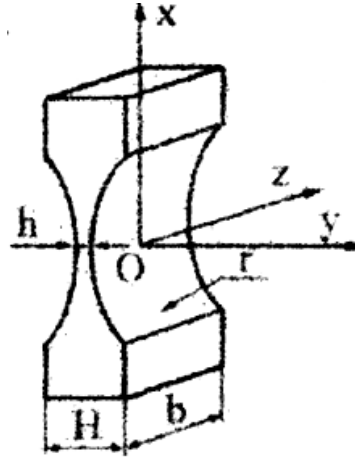


Рис. 9. Пружний підвіс

Спочатку розрахуємо значення жорсткостей пружного підвісу.

Наближені значення жорсткостей пружного елемента (ПЕ) можуть бути представлені в наступному вигляді:

$$c_{\text{лх}} \approx \frac{b \cdot E_1}{\pi} \cdot \left(\frac{h}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \quad c_{\text{лу}} \approx \frac{2 \cdot b \cdot E_1}{3 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{h}{r}\right)^{\frac{3}{2}} \quad c_{\text{лз}} \approx \frac{5 \cdot b \cdot E_1}{12 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{h}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

$$c_{\text{yx}} \approx \frac{b^2 \cdot E_1}{18 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{h}{r}\right)^{\frac{3}{2}} \quad c_{\text{yy}} \approx \frac{b^3 \cdot E_1}{12 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{h}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \quad c_{\text{yz}} \approx \frac{2 \cdot b \cdot r^2 \cdot E_1}{9 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{h}{r}\right)^{\frac{5}{2}}$$

$E_1 = \frac{E}{1-\mu^2}$ - Модуль пружності матеріалу, що враховує пластинну форму ПЕ.

E- модуль пружності першого роду для матеріалу ПЕ,

μ - коефіцієнт Пуассона.

$h=0.015 \cdot 10^{-3}\text{м}$, $H = 0.3 \cdot 10^{-3}\text{м}$, $b = 2 \cdot 10^{-3}\text{м}$, $E = 12 \cdot 10^{10}\text{Па}$, $\mu = 0$.

При даних параметрах ЧЕ, отримаємо наступні значення в

$$c_{\text{лх}} \approx 3.5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}; \quad c_{\text{лу}} \approx 8.8 \cdot 10^3 \text{ Н/м}; \quad c_{\text{лз}} \approx 1.5 \cdot 10^6 \text{ Н/м};$$

						Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$c_{yx} \approx 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ Нм}; \quad c_{yy} \approx 0.66 \text{ Нм}; \quad c_{yz} \approx 1.8 \cdot 10^{-4} \text{ Нм};$$

c_{lx}, c_{ly}, c_{lz} - жорсткості пружних елементів у напрямі осей Ox, Oy, Oz ;

c_{yx}, c_{yy}, c_{yz} - кутові жорсткості пружних елементів у напрямі осей Ox, Oy, Oz ;

3.1. Ідеальне встановлення

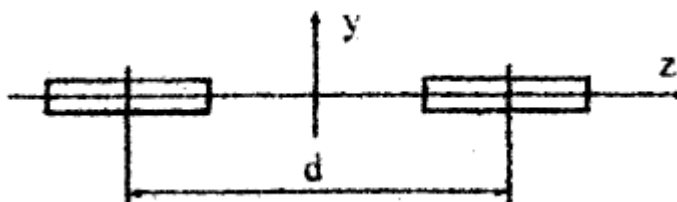


Рис. 10. Ідеальне встановлення

Очевидно, що в ідеальному випадку для двох пружних елементів з яких складається пружний підвіс :

$$c_y = 2c_{yz} = 3.508 \cdot 10^{-4} \text{ Нм};$$

3.2. Кутовий перекіс

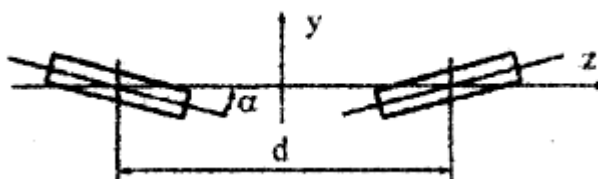


Рис. 11. Кутовий перекіс

Кутова жорсткість підвісу в такому режимі роботи визначатиметься по формулі:

$$c_y = 2c_{yz} + 2c_{yy}\alpha^2$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{c_{yz}}{c_{yy}}} = \sqrt{\frac{1.754 \cdot 10^{-4}}{0.659}} = 0.92^\circ$$

					Арк.
					35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

$$c_y = 2 \cdot 1.8 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 0.66 \cdot 0.016 = 0.02 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

В цьому випадку кутова жорсткість підвісу збільшується приблизно в два рази, що приводить до збільшення похибок, які залежать від неї. Тому при виготовленні підвісу потрібно забезпечити вимоги кутового перекосу відносно осі Ох, в нашому випадку переки́с не повинен перевищувати 0.5° , якщо ці вимоги не будуть виконані, показники кутової жорсткості будуть не співпадати з нашими розрахунками, що буде приводити до критичних похибок.

3.3. Лінійний зсув уздовж осі ОУ

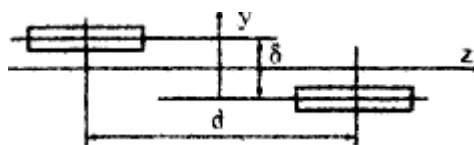


Рис. 12. Лінійний зсув

В даному випадку можна розглянути два варіанти роботи пружного підвісу, коли ПЕ працюють на стиснення-розтягування (Рис. 10) і реальніший, коли обидва елементи працюють на кручення. У першому випадку кутова жорсткість підвісу визначатиметься по формулі: $c_y = 2c_{yz} + 2c_{\text{лх}}(\delta/2)^2$

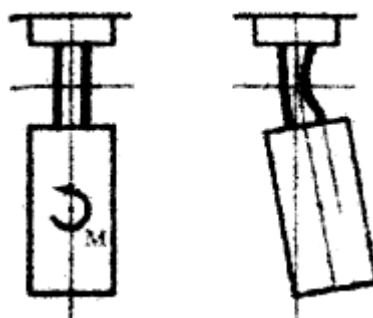


Рис. 13. Варіанти роботи пружного підвісу

Тоді кутова жорсткість визначатиметься умовою:

$$\delta = 2 \cdot \sqrt{\frac{c_{yz}}{c_{\text{хз}}}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1.754 \cdot 10^{-4}}{3.509 \cdot 10^6}} = 1.414 \cdot 10^{-5}$$

					Арк.
					36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

$$c_y = 2 \cdot 1.8 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 3.5 \cdot 10^6 \left(\frac{1.414 \cdot 10^{-5}}{2} \right)^2 = 7.016 \cdot 10^{-4} \text{ (Н} \cdot \text{м)};$$

У випадку якщо прийняти жорсткість на стиснення-розтягування нескінченною тоді обидва ПЕ працюватимуть на кручення. В цьому випадку кутова жорсткість підвісу визначатиметься по формулі:

$$c_y = 2c_{yz} + 2c_{yx}\gamma^2$$

де, $\gamma = \frac{\delta}{d}$ - кут повороту ПЕ.

Приймаючи $d = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, коефіцієнт кутової жорсткості визначатиметься умовою:

$$\delta = d \cdot \sqrt{\frac{c_{yz}}{c_{yx}}} = 1.2 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{1.754 \cdot 10^{-4}}{1.654 \cdot 10^{-2}}} = 3.92 \cdot 10^{-4}$$

$$c_y = 2 \cdot 1.8 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 1.7 \cdot 10^{-3} \cdot 15.36 \cdot 10^{-8} \text{ (Нм)}$$

Як бачимо при лінійному зсуві уздовж осі Оу коефіцієнт жорсткості буде майже не змінюватись, тому якщо прийняти наші умови для розрахунку стандартними, то жорстких вимог пред'являти не потрібно.

Кутовий перекис відносно осі Оу

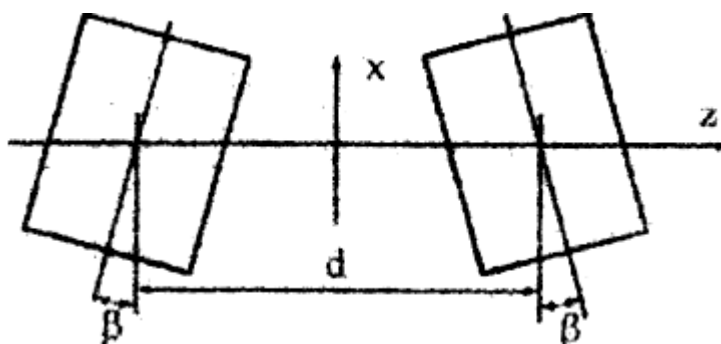


Рис. 14. Кутовий перекис

Кутова жорсткість підвісу в такому режимі роботи визначатиметься за формулою:

						Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$c_y = 2c_{yz} + 2c_{yx}\beta^2$$

Тоді подвоєння коефіцієнта кутової жорсткості визначатиметься умовою:

$$\beta = \sqrt{\frac{c_{yz}}{c_{yx}}} = \sqrt{\frac{1.754 \cdot 10^{-4}}{1.645 \cdot 10^{-2}}} \approx 18.72^\circ$$

$$c_y = 2 \cdot 1.8 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 1.7 \cdot 10^{-3} \cdot 0.32 = 1.4 \cdot 10^{-3} \text{ (Нм)}$$

В даному випадку кутовий перекіс відносно осі Оу, не є для нас критичним, але з розрахунків видно, що кутова жорсткість змінюється, а відповідно похибки обумовлені нею будуть відрізнятись від розрахованих, що буде приводити до неточних вимірів приладу, тому кутовий перекіс потрібно робити якомога меншим.

3.4. Компенсація динамічної похибки

Маятниковий акселерометр при наявності змінних прискорень, як відомо, має методичну похибку. Якщо прискорення $\dot{V}_\eta = j_1 \sin \omega t$ і $\dot{V}_\zeta = j_2 \sin \omega t$ діють одночасно на прилад, то акселерометр буде мати максимальну похибку виду

$$\dot{V} = 0.5 \left(\frac{ml}{k} \right) \lambda \cdot j_1 \cdot j_2 \quad (3.2)$$

де \dot{V} – похибка акселерометра при лінійній вібрації;

m – маса ЧЕ;

l – довжина маятника;

k – жорсткість підвісу;

j_1, j_2 – амплітуди прискорень;

λ – коефіцієнт динамічного сприймання приладу;

$$\lambda = \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{n_0} \right)^2 \right]^2 + 4\xi^2 \left(\frac{\omega}{n_0} \right)^2} \quad (3.3)$$

ξ – ступінь демпфування власних коливань

$$\xi = \frac{B}{2\sqrt{RI}}$$

де B – коефіцієнт кутового демпфування;

I – момент інерції рухомого вузла;

						Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тобто для обчислення цієї похибки, і наступної її компенсації власних параметрів акселерометра (формули $(V = 0.5 \left(\frac{ml}{k}\right) \lambda \cdot j_1 \cdot j_2)$ та

$(\lambda = \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{n_0}\right)^2\right]^2 + 4\xi^2 \left(\frac{\omega}{n_0}\right)^2})$), треба мати за вимірювача складових прискорень j_1, j_2 .

Ці вимірювання доцільно робити, використовуючи двовісний мікромеханічний акселерометр, наприклад типу КХ 224-1053

Як видно з для зменшення похибки акселерометра, за «косої» вібрації необхідно зменшувати маятниковість приладу і збільшувати жорсткість пружини k . Ця похибка має суттєве значення при наявності низькочастотних збурень. З ростом частоти вібрації похибка різко зменшується.

						Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки:

В бакалаврському проекті виконано огляд схем побудови маятникових акселерометрів та проведені розрахунки основних елементів акселерометра: чутливого елементу, датчиків кута та моменту.

На основі дослідження рівняння руху ЧЕ акселерометра при дії вібрації розроблено математичну модель динамічної похибки, яку використану як основу для формування коригуючого сигналу.

						Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список літератури:

1. Коновалов С.Ф., Никитин Є.А., Селиванова Л.М. Проектирование гироскопических систем. Проектирование гироскопических систем. Ч III. Акселерометры, датчики угловой скорости, интегрирующие гироскопы и гиросинтезаторы.
2. Лекції з курсу «Проектування приладів».
3. Никитин Е.А., Балашова А.А. Гироскопические системы. Элементы гироскопических приборов 1988 г.
4. Турчин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. Электрические измерения неэлектрических величин. 1975 г.
5. Аврутов В.В., Бондар П.М., Мелешко В.В. Мікроакселерометри та їх випробування: Навчальний посібник. 2008 р.
6. Распопов В.Я. Микромеханические приборы 2007 г.

						Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		